

ポアソン分布を用いた SCC 発生・進展の試算

Calculation of SCC detection and growth using a Poisson distribution

日本原子力研究開発機構

渡士 克己

Katsumi WATASHI

Member

A Poisson distribution well represents SCC initiation and subsequent small scale growth in material tests. This report describes the Poisson distribution application to LWR SCC database which was arranged from NUCIA. Frequencies were plotted against operated duration, then a Poisson's parameter was set to represent SCC aspect. In subsequent step, for one case of IASCC, a crack propagation was calculated. Fitting degrees of the distributions and a major parameter on failure probability were emphasized.

Keywords: SCC, IASCCC, NUCIA, Frequency, Failure

1. 緒言

応力腐食割れ (SCC) は古くて新しい課題であり、SCC 発生や進展に関連するメカニズムの研究が現在でも多い。本報告では、メカニズムに立ち入らずに、SCC 発現報告を検討のベースとしてその特徴を整理し、メカニズムごとに分類した SCC のうち IASCC について割れ進展による破損の生起確率を算出した。

2. 割れ発生時間の可能性計算

応力腐食割れ (Stress Corrosion Crack : SCC) は、その発生および進展過程が確率過程であることから、定量的評価に当たっては確率論的なアプローチも必要である。SCC 割れ発生過程の観察例として、250°C 高純度水環境の隙間付き曲げ試験 (CBB 試験) における鋭敏化 Type304 鋼の SCC 深さ分布の最頻値の試験時間依存性を図 1 に示す[1]。試験時間の比較的初期から形成される深さ 50 μm 以下の微小割れは非進展性であって、近接して生じた他の微小割れと合体することで、定常進展割れとして進展を開始する。このような挙動は同じ環境の普通鋼、Alloy600 系 Ni 基ステンレス合金から、30~80°C の中性塩化物水溶液環境あるいは湿潤大気環境における鋭敏化 Type304 鋼まで、幅広い材料および環境下で観察される。

ポアソン確率過程に従う事象が時間間隔 t の間に m 回起こる確率 $p(m)$ は次式で与えられる。

$$p(m) = \left[\frac{(\lambda t)^m}{m!} \right] \exp(-\lambda t) \quad [m = 0, 1, 2, \dots] \quad \dots \dots (1)$$

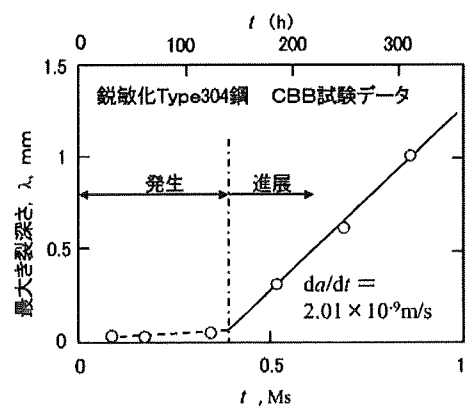


図 1 SCC き裂深さの試験時間依存性の例[1]

パラメータ λ はこの事象の生起速度であり、ここでは割れ発生率を表す。時間を $t=1$ 一定とすると式(1)は

$$p(m) = \left[\frac{\lambda^m}{m!} \right] \exp(-\lambda) \quad [m = 0, 1, 2, \dots] \quad \dots \dots (2)$$

となり、式(2)は単位時間当たりに m 個の割れが発生する確率を表す。

式(2)に標本個数 n を乗ざると、 m 個の割れが発生する標本数、すなわち度数分布を表すことになる。250°C 高純度水環境の隙間付き曲げ試験 (CBB 試験) における鋭敏化 Type304 鋼の SCC について臨界深さ 50 μm を超える定常進展割れの度数分布に式(2)のポアソン分布を当てはめた結果を図 2 に示す[1, 2]。200 μm を超える定常進展割れの度数分布に当てはめた結果を図 3 に示す[2]。このように割れ発生数の分布がポアソン分布で近似できることから、割れ発生数の時間的分布もポアソン確率過程で近似できると考えられる。

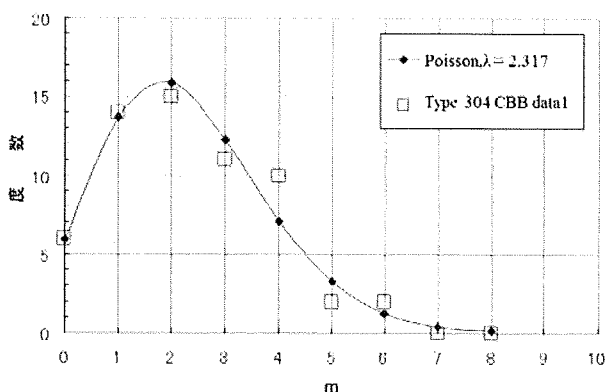


図2 ポアソン分布の当てはめ例1

($a > 50\mu\text{m}$ の定常進展割れの度数分布、[1, 2])

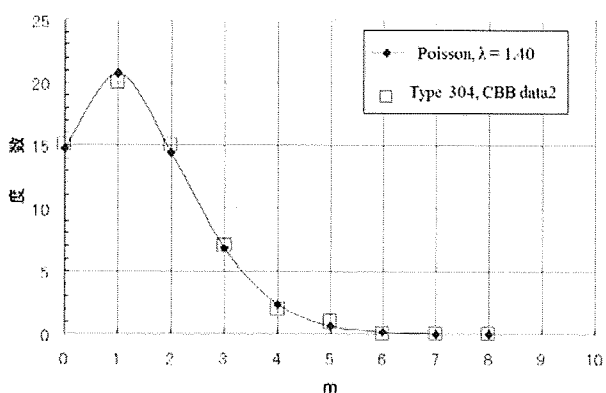


図3 ポアソン分布の当てはめ例2

($a > 200\mu\text{m}$ の定常進展割れの度数分布、[2])

3. 軽水炉データの分類と分布のあてはめ

原子力施設公開ライブラリー (NUCIA) [3] では国内軽水炉の事故事例をデータベース化し公開している。NUCIA データベースから 2009 年末までに報告された国内軽水炉の SCC のデータを抽出し、運転開始年月、割れ発見年月、割れ発見までの運転時間 $t_{\text{day}} = \text{割れ発見年月} - \text{運転開始年月}$ 、炉型式、材質、損傷部位、損傷モード、損傷要因、損傷状況を取りまとめた。とりまとめに当たっては日本機械学会で発行している SCC の事例規格[4]を参照し、事例規格に採用されているケース、対象外とされた IASCC のケース、事例規格に記載がないが同様に認められる SCC のケースを抽出した。これらの SCC データを、事例規格および最新の SCC 研究成果を参考に以下の 5 種類に分類した。

分類1 ; SUS SCC (ステンレス鋼に特有な SCC 環境、加工ひずみ・残留応力が主要因で発生した SCC)。割れの起点および進展経路とも結晶粒界であり

IGSCC の形態となる。PWR の SG 細管の U ベンド曲げ加工部に発生した事例が多い。BWR の再循環系配管の突合せ溶接部に発生した事例も見られる。

分類2 ; SUS SCC (ステンレス鋼に特有な SCC 環境、加工ひずみ・残留応力が主要因で発生した SCC)。加工ひずみ・残留応力の大きい表面が割れの起点となり、初期は結晶粒内を進展し (TGSCC)、内部に向かって進展が進むと粒界進展型 (IGSCC) に移行する。BWR 炉心シュラウド溶接部に発生例が多い。

分類3 ; PWSCC。Ni 合金に特有な SCC 環境、加工ひずみ・残留応力が主要因で発生した割れ。PWR の一次冷却水環境下で、Ni 系合金 600 の SG 細管、SG 入口管台の肉盛部および突合せ溶接部に発生例が多く、PWSCC あるいは NiSCC と呼ばれるようになった。割れの起点および進展経路とも結晶粒界であり IGSCC の形態となる。

分類4 ; IASCC。SUS 系材料、SCC 環境、加工ひずみ・残留応力、中性子照射により誘起された割れ。割れの起点および進展経路とも結晶粒界である IGSCC の形態となる。BWR の SUS316L 材質の制御棒駆動部に発生例が多い。

分類5 ; ESCC。海水付着部、ビニールテープ貼り付け部など、塩化物による腐食環境、表面傷、表面加工ひずみ・残留応力などの重畳で割れが発生し進展する。粒内型 TGSCC の形態となる。

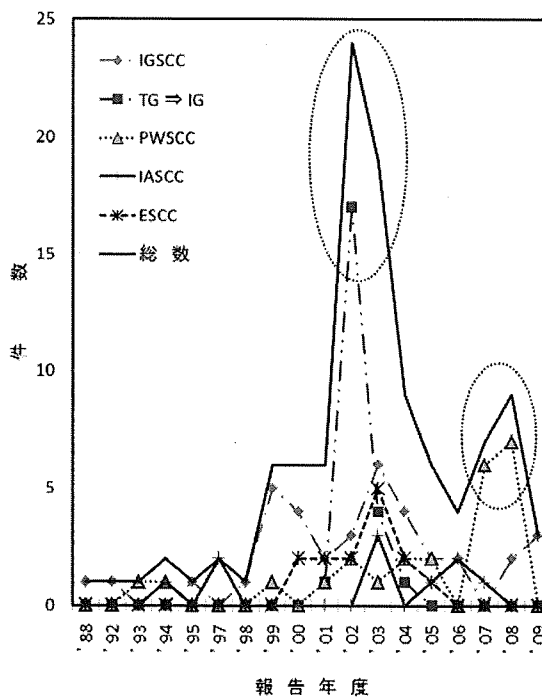


図4 報告件数の推移

図4にSCC割れ報告件数の年度別の推移を示す。報告総数を見ると、2002-2003年度に分類2 (TG ⇒ IG) 及び分類1 (IGSCC)に起因する山が、2007-2008年度に分類3 (PWSCC)に起因する山が見受けられる。

国内軽水炉のSCC割れ報告データをこれら5種類に分類し、運転時間区間 (5~10年、10~15年、15~20年、20~25年、25~30年、30~35年、35~40年) の報告件数を度数分布として整理した結果を表1に示す。運転時間5年未満のデータはなかったため、潜伏期間を5年と仮定する。

表1 国内軽水炉のSCC割れの分類

番号	分類	報告件数	発見されるまでの運転時間 (year)							
			5	10	15	20	25	30	35	40
1	SUSSCC(IG)	37	0	1	6	13	6	7	3	1
2	SUSSCC(TG,TG⇒IG)	23	0	5	5	12	0	1	0	0
3	PWSCC(IG,Ni基合金)	24	0	1	1	6	8	4	3	1
4	IASCC(IG,BWR)	10	0	0	1	6	0	2	1	0
5	ESCC(TG)	14	0	1	0	1	7	5	0	0
	合計	108	0	8	13	38	21	19	7	2

単位時間区間幅5年毎の割れ発生報告件数をプロットした結果を図5.1(軽水炉全体)、図5.2(分類2)、図5.3(分類4)に示す。これらの図にはポアソン分布式(2)を、時間区間番号 $m+1=1, 2 \dots 7$ 内での割れ発生確率とみなして報告件数を計算した結果を示した。本分類整理で得た国内軽水炉のSCC割れ報告件数のポアソン分布のパラメータ λ を、文献[1, 2]に記載されたCBB試験片一個あたりの定常進展割れの度数分布の事例と比較して表2に示す。分類1から分類5では λ は1.5 ~ 3.2の範囲であり、全体平均で $\lambda = 2.4$ となった。これは文献[1, 2]の例 ($\lambda = 2.317$ および $\lambda = 1.4$) と同じレベルにある。

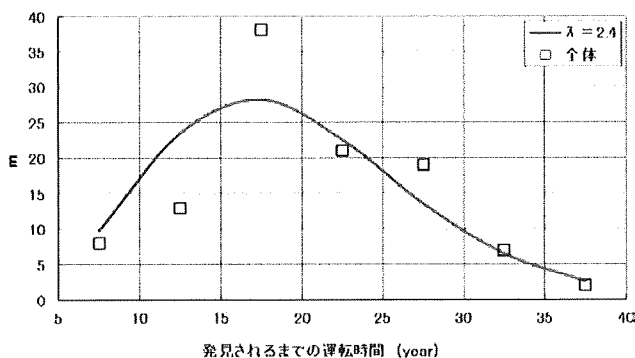


図5.1 国内軽水炉 SCC 割れ発生時間のポアソン分布あてはめ (全データ)

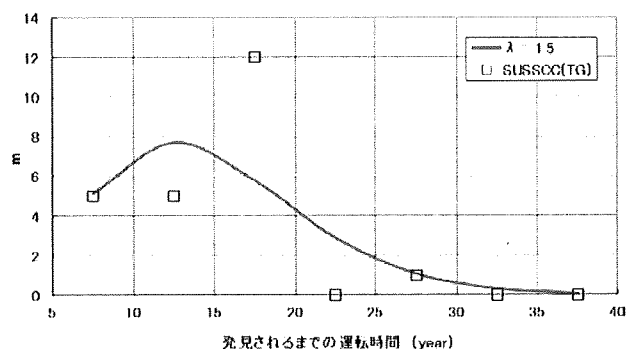


図5.2 同 (分類2)

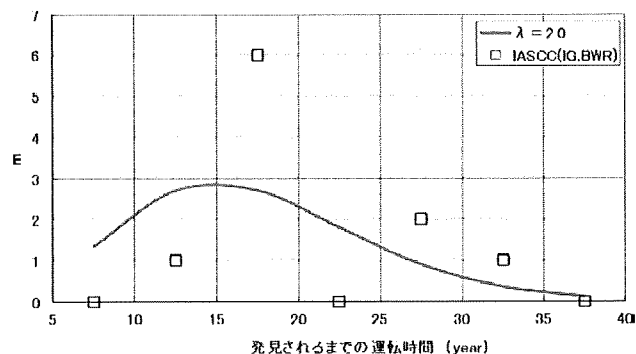


図5.3 同 (分類4)

表2 ポアソン分布の当てはめ結果

分類	総数	λ	備考
国内軽水炉全体	108	2.4	
国内軽水炉SUS,IG	37	2.5	潜伏期間を5年として、以後の5年区間毎の割れ報告件数の度数分布にポアソン分布を当てはめた場合
国内軽水炉SUS,TG	23	1.5	
国内軽水炉NiSCC	24	3.2	
国内軽水炉IASCC	10	2.0	
国内軽水炉ESCC	14	3.1	
鋭敏化304CBB試験	60	2.317	$a > 50 \mu\text{m}$ の割れ個数
鋭敏化304鋼CBB試験	60	1.4	$a > 200 \mu\text{m}$ の割れ個数

4. 照射誘起割れの進展可能性計算

軽水炉の炉内構造物は中性子照射環境にあるため、照射条件、材質、環境に応じて、照射誘起割れの発生および進展が生じる (IASCC)。ここでは材質 SUS316L、板厚 $T = 0.1 \text{ m}$ の部材を想定して、定常進展割れ発生確率および割れ進展速度定数を確率分布で与えた進展計算を行い、破損確率を算出する。

IASCCにより深さ $a = 50 \mu\text{m}$ の定常進展割れの発生する累積確率が、国内軽水炉のIASCC割れ報告データを参考にして、潜伏期間が5年、以後5年毎の時間区間の発生確率がポアソン分布式(2)で $\lambda = 2.0$ と与えられた場合とする。ここで最初の時間区間 (5~10年) を $m=0$ とし、以後 $m=1, 2, \dots, 10$ とする。定常進展割れの累積発生確率を図6に示す。本報では運転

期間 60 年を時間幅 $\Delta t = 2.5$ 年の 24 区間に分割し ($j = 1, 24$), 各区間の開始時間 $t_j = 2.5 \times (j-1)$ を割れ発生時間として、以後の定常割れ進展を計算し、割れ深さ $a = 0.8 T$ に達した時点破損とみなすこととする。時間区間 $j (t_j < t < t_{j+1})$, ($j = 1, 24$) に定常進展割れが発生する確率は次式で与えられる。

$$P_1^{mit} = P_2^{mit} = 0, P_3^{mit} = P_4^{mit} = p(m=0)/2, \\ P_5^{mit} = P_6^{mit} = p(m=1)/2, \dots, P_{23}^{mit} = P_{24}^{mit} = p(m=10)/2 \quad \dots\dots(3)$$

最初の 2 区間は潜伏期間であり、確率 0 とした。以後の 2.5 年の区間について、5 年区間の発生確率の 1/2 とした。時間区間 j の定常進展割れ (発生時間 t_j) が時間 t に深さ $a = 0.8 T$ に達する破損確率は次式で与えられる。

$$F_j^{mit}(t) = F^{Grow}(t - t_j) \quad \dots\dots(4)$$

ここに $F^{Grow}(t)$ は初期割れ深さ $a = 50 \mu m$ が時間 t 年経過後に $a = 0.8 T = 0.08 m$ に達する確率である。これから、各時間区間の発生確率と発生後の破損確率を乗じて、総和を計算すると、時間依存の破損確率が次式で得られる。

$$F(t) = \sum_{j=1}^{24} [P_j^{mit} F_j^{mit}(t)] = \sum_{j=1}^{24} [P_j^{mit} F^{Grow}(t - t_j)] \quad \dots\dots(5)$$

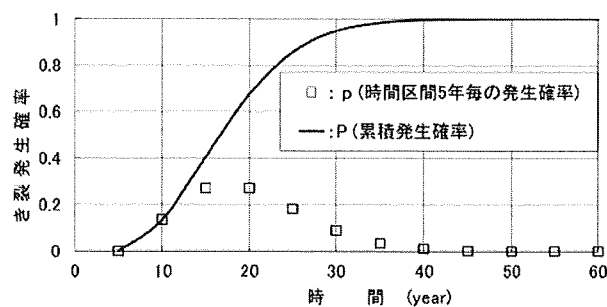


図 6 定常進展割れ発生時の累積発生確率 ($a = 50 \mu m, \lambda = 2.0$)

定常進展割れの進展速度の平均値は次式で与えられるものとした[4]。

$$\frac{da}{dt} \left(\frac{m}{S} \right) = 4.60 \times 10^{-12} K^{1.23} \phi^{1.83} \quad (\phi \leq 4 dpa) \\ \frac{da}{dt} \left(\frac{m}{S} \right) = 5.85 \times 10^{-11} K^{1.2} \quad (4 dpa \leq \phi \leq 11 dpa) \quad \dots\dots(6)$$

ここに $K \text{ MPa}\sqrt{m}$ は応力拡大係数、 $\phi \text{ dpa}$ は中性子照射量である。本報では $\phi = 1 \text{ dpa}$ と $\phi = 4 \text{ dpa}$ の 2 ケースについて試算する。進展速度の単位を m/y に変換すると次式となる。

ケース 1 ($\phi = 1 \text{ dpa}$)

$$\frac{da}{dt} \left(\frac{m}{y} \right) = C \times K^{1.23} = X \times C_{mean} \times K^{1.23} \quad \dots\dots(7.1) \\ C_{mean} = 1.452 \times 10^{-4}$$

ケース 2 ($\phi = 4 \text{ dpa}$)

$$\frac{da}{dt} \left(\frac{m}{y} \right) = C \times K^{1.2} = X \times C_{mean} \times K^{1.2} \quad \dots\dots(7.2) \\ C_{mean} = 1.846 \times 10^{-3}$$

確率変数 C は対数正規分布とし、 $X = C / C_{mean}$ が 1/2 倍から 2 倍に入る確率が 95% であるとする ($\log X$ の標準偏差が 0.35)。割れ進展速度の分布を図 7 に示す。

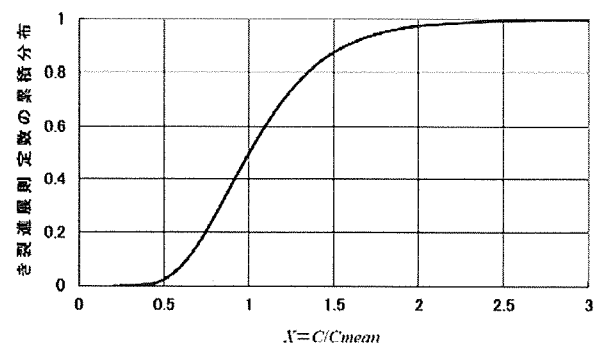


図 7 仮定した割れ進展速度定数 $X = C / C_{mean}$ の確率分布 (対数正規分布の累積分布)

X を 11 区間に分割し、その中間確率点を代表値とした。確率変数 X の分割点、区間代表値、区間確率を表 3 に示す。確率 0.0~0.01 の第 1 区間を中間確率 0.005 となる $X_1 = 0.4059$ で代表させ、確率 0.01~0.04 の第 2 区間を中間確率 0.025 となる $X_2 = 0.5036$ で代表させ、以下同様に、確率 0.99~1.0 の第 11 区間を中間確率 0.995

となる $X_{11}=2.4634$ で代表させた。各区間確率は次式で与えられる。

$$P_k^{Grow}(k=1,11) = 0.01, 0.03, 0.06, 0.10, 0.20, 0.20, 0.20, 0.10, 0.06, 0.03, 0.01 \quad \dots\dots\dots(8)$$

表3 定常割れ進展速度の区間分割
(細字は区間分割点, 太字は代表点)

累積確率 P	$X_i=C_iC_{mean}$	P の区間	X_i
0.00	0.0000		
0.005	0.4059	0.00~0.01	X_1
0.01	0.4430		
0.025	0.5036	0.01~0.04	X_2
0.04	0.5419		
0.07	0.5966	0.04~0.10	X_3
0.1	0.6386		
0.15	0.6958	0.10~0.20	X_4
0.2	0.7449		
0.3	0.8323	0.20~0.40	X_5
0.4	0.9151		
0.5	1.0000	0.40~0.60	X_6
0.6	1.0927		
0.7	1.2015	0.60~0.80	X_7
0.8	1.3425		
0.85	1.4373	0.80~0.90	X_8
0.9	1.5660		
0.93	1.6762	0.90~0.96	X_9
0.96	1.8455		
0.975	1.9857	0.96~0.99	X_{10}
0.99	2.2574		
0.995	2.4634	0.99~1.00	X_{11}
1.00	∞		

各区間 k に対して割れ進展定数 $C_k = X_k \times C_{mean}$ および初期割れ深さ $a = 50 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ を与えて、割れ進展計算を行った。割れ形状を半楕円表面割れとし、進展計算は文献[5]の添付 E-5 の 5.3 表面欠陥に対する算出法に基づいた。割れの表面長さを L とし、アスペクト比 a/L は 0.2 を維持するものと仮定した。進展に伴い $a/L = 0.3$ 近傍に収束することが知られているが、深さ方向の進展評価では $a/L = 0.2$ とした方が進展速度は大きくなる。膜応力に対する影響係数 G_0 は文献[5]表添付 E-5-1 をき裂進展速度が大きめとなるよう直線近似した次式を採用した。

$$G_0 = 1.0856 + 0.3519(a/t) \quad \dots\dots\dots(9)$$

膜応力 $\sigma = 50 \text{ MPa}$ とし、応力拡大係数を次式で計算した。

$$K = \sigma G_0 \sqrt{\pi a/Q} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$Q = 1 + 4.593(a/L)^{1.65}$$

時間増分 $dt = 0.01$ 年として各区間代表点に対して割れ進展計算を行った結果を図8(ケース1)および図9(ケース2)に示す。

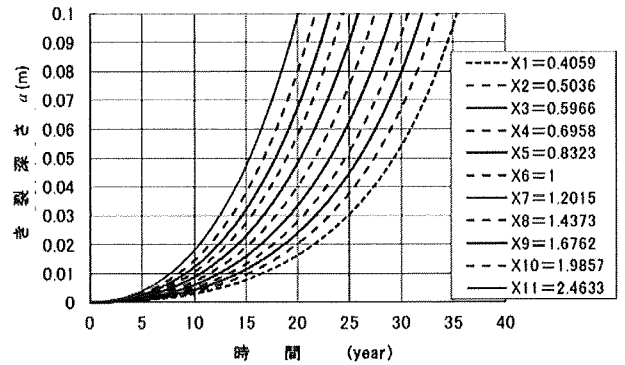


図8 SCC 割れ進展計算結果 (ケース 1)

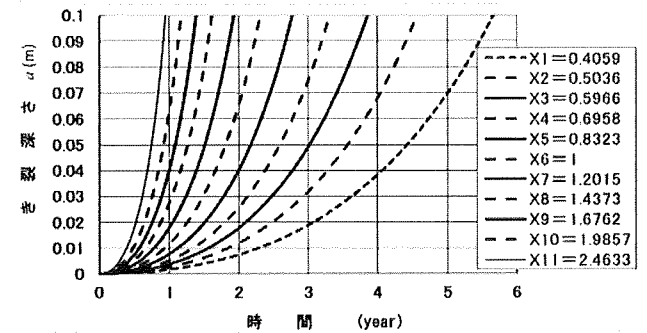


図9 SCC 割れ進展計算結果 (ケース 2)

各区間代表点の時間依存破損確率を求め、次式の数値積分により、定常進展割れ $a = 50 \mu\text{m}$ が一個存在した場合の時間依存破損確率を算出した。

$$F^{Grow}(t) = \sum_{k=1}^{11} P_k^{Grow} F_k^{Grow}(t) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式(11)を式(5)に代入すると、割れ発生確率を含めた時間依存の破損確率が次式のように求められる。

$$F(t) = \sum_{j=1}^{24} [P_j^{Init} F_j^{Init}(t)] = \sum_{j=1}^{24} [P_j^{Init} F^{Grow}(t-t_j)] \quad \dots\dots(12)$$

$$= \sum_{j=1}^{24} \left[P_j^{Init} \left\{ \sum_{k=1}^{11} P_k^{Grow} F_k^{Grow}(t-t_j) \right\} \right]$$

このようにして求めた潜伏期間 5 年、SCC 発生時間に

ついてポアソン分布パラメータ $\lambda=2.0$ を用いた時間依存の破損確率を図10に示す。

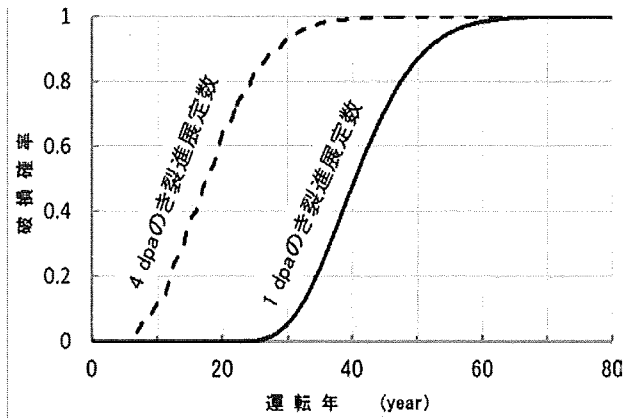


図10 1 dpa と 4 dpa のき裂進展速度に対応した破損確率の経時変化の状況

まとめ

NUCIA に登録されている事例のうち 2009 年末までに報告された国内軽水炉の SCC データに基づいて、5 年毎の度数分布を用いた割れ発生と進展の統計的検討を行った結果は次のようにまとめられる。

(1) 報告データには 2002-2003 年度および 2007 年度・2008 年度に頻度の山があり、割れ発生を常時観察している材料試験の観察ほどにはポアソン分布は SCC 割れ報告時期を表現しない。

(2) IASCC について割れ報告（発生）後の進展を照射量一定の仮想条件で計算した結果、照射量の違いによる割れ進展速度式の差異が破損確率に及ぼす影響が大きい。

参考文献

- [1] 明石、応力腐食き裂発生挙動の確率・統計的取り扱い、金属 Vol.73(2003) No.8
- [2] 明石、SCC 発生評価法の現状と課題に関する調査、SCC 評価法の現状と課題に関する調査報告会、2007 年 4 月 15 日、JAEA
- [3] 日本原子力技術協会、原子力施設情報公開ライブラリー NUCIA <http://www.nucia.jp/>
- [4] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2001 年版及び 2005 年版)、事例規格「過圧防護に関する規定(NC-CC-002)」及び事例規格「応力腐食割れ発生抑制に対する考慮(NC-CC-002)」に関する技術評価書、平成 18 年 8 月、JNES
- [5] K. Takakura et al., IASCC EVALUATION METHOD FOR IRRADIATED CORE INTERNAL STRUCTURES IN BWR POWER PLANTS, Proceedings of the ASME 2010 PVP, PVP2010-25293, 2010
- [6] 日本機械学会、発電用原子力設備規格 維持規格(2008 年版)、添付 E-5 応力拡大係数の算出、JSME S NA1-2008、2008 年 10 月